# 果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人

刘理民[1,2]，何雄奎[1,2*]，刘伟洪[3]，刘紫嫣[1,2]，韩　虎[1,2]，李扬帆[1,2]

（1. 中国农业大学 理学院，北京 100193；2. 中国农业大学 农业无人机系统研究院，北京 100193；
3. 中国农业大学 工学院，北京 100083）

**摘　要：**为同时实现果园智能植保机自主导航及自动对靶喷雾，研制了一种果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人。首先采用单个3D LiDAR（Light Detection and Ranging）采集果树信息确定兴趣区（Region of Interest，ROI），对ROI内点云进行2D化处理得到果树质心坐标，通过随机一致性（Random Sample Consensus，RANSAC）算法得到果树行线，并确定果树行中间线（导航线），进而控制机器人沿导航线行驶。通过编码器及惯性测量单元（Inertial Measurement Unit，IMU）确定机体速度及位置，IMU矫正采集到的果树分区冠层信息，最后通过程序判断分区冠层的有无控制喷头是否喷雾。结果表明，机器人自主导航时最大横向定位偏差为21.8 cm，最大航向偏角为4.02°，相比于传统连续喷雾机施药液量、空中漂移量及地面流失量分别减少20.06%、38.68%及51.40%。本研究通过单个3D LiDAR、编码器及IMU在保证喷雾效果的前提下，实现了喷雾机器人自主导航及自动对靶喷雾，降低了农药使用量及飘失量。

**关键词：**自主导航；对靶喷雾；LiDAR；随机一致性算法；机器人；惯性测量单元

**中图分类号：**TP242；S224.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202207008

引用格式：刘理民, 何雄奎, 刘伟洪, 刘紫嫣, 韩虎, 李扬帆. 果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 63-74.

LIU Limin, HE Xiongkui, LIU Weihong, LIU Ziyan, HAN Hu, LI Yangfan. Autonomous navigation and automatic target spraying robot for orchards[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 63-74. (in Chinese with English abstract)

## 1　引　言

目前，中国的果园植保机半数以上没有驾驶室，作业人员完全暴露在施药环境中[1,2]，而果园遥控植保机控制范围有限，人机没有完全分离，存在一定安全隐患[3]。具备自主导航功能的植保机人机完全隔离，保障了作业时人员安全，将在植保设备中占有很大的市场[4]。其中基于全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）的自主导航解决方案已在野外作业环境中得到充分应用[5]。

现代化果园采用宽行密植种植模式，与传统果园作业环境相比具有行距宽、株距窄的特点，株间枝叶紧密衔接呈“树墙”结构，导航场景较为简单[1,5,6]。目前果园自主导航作业以视觉导航和激光导航为主[7,8]。视觉导航通过摄像头采集果园环境的图像及视频信息，结合采集信息中的树干颜色、材质与形状等特征对导航线进行提取，标定相机内外参数以确定机器人相对于果树

收稿日期：2022-07-16

基金项目：国家梨产业体系（CARS-28）；国家自然科学基金资助项目（31761133019）；中国农业大学2115人才培育发展支持计划；三亚中国农业大学研究院引导资金项目（SYND-2021-06）

作者简介：刘理民（1994—），男，博士研究生，研究方向为智慧果园及智能植保机械。E-mail：liulimsy2882@163.com

*通信作者：何雄奎（1966—），男，博士，教授，研究方向为农业无人机系统及植保技术。E-mail：xiongkui@ cau.edu.cn

的位置，最终实现自主导航控制[9,10]。视觉传感器虽然具有成本低、信息丰富的优点，但成像质量易受光线干扰，不能直接获取周围环境的深度信息，无法全天候作业[11]。

激光导航采用LiDAR（Light Detection and Ranging）对果园环境进行实时扫描，通过探测果园中不同果树位置，实现机器人的相对定位。激光具有主动发光、测距精度高等优点，可全天候作业，对环境适应能力强[12]。Santos等[13]依据同时定位与地图构建（Simultaneous Localization and Mapping，SLAM）技术开发了不依赖全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）定位的VineSlam定位与建图方法和专用于葡萄园的路径规划器“AgRobPP”，该方法的建图与路径规划效果良好，可控制机器人执行多种任务。基于3D激光雷达的SLAM技术，可以较全面地探测周围环境信息，增强机器人移动时的安全性，但也增加了计算负担，对计算性能提出了更高的要求。Saike等[14]对3D LiDAR数据进行了2D化处理，实现了温室内的自主导航作业。刘伟洪等[15]则使用3D LiDAR实现了导航线提取及自主导航，但未对冠层特征进行处理。以上研究采用2D LiDAR或将3D LiDAR进行2D化处理以实现自主导航作业，但未获得完整果树特征信息。

上述导航传感器在果园精准变量喷雾中可用于收集果树冠层特征（冠层体积及叶面积指数等）信息，其中LiDAR不仅可用于自主导航作业，还能获取周围果树特征以用于精准变量喷雾作业[16-20]，在果园精准变量喷雾方面应用最为广泛[21]。李龙龙等[22]及窦汉杰等[23]采用竖直安装的2D LiDAR获取果树特征信息，分别实现了仿形变量喷雾及自动对靶喷雾（有冠层时喷雾，无冠层时不喷雾是精准变量喷雾技术的一种[23,24]），达到了减少农药漂失、节省药液的目的。探测果树信息时，LiDAR竖直安装可尽量多地获取果树外貌轮廓特征信息，但机体前进方向为探测盲区无法实现自主导航作业[18]。相比于2D LiDAR，水平安装的3D LiDAR可以探测周围环境较为完整的信息[16]。

通过以上研究可知，LiDAR可实现全天候信息采集，而3D LiDAR可获取周围环境前后及上下（一定角度）的三维信息。以上研究未能使用单个3D LiDAR实现既能自主导航又能自动对靶喷雾作业。基于上述情况，本研究利用水平安装的3D LiDAR获取果树点云信息并截取合适感兴趣区（Region of Interest，ROI），并对ROI内的点云进行裁剪、滤波、欧式聚类及2D化等处理，得到果树质心位置。通过随机一致性（Random Sample Consensus，RANSAC）算法，得到机体左右果树行线公式，依据果树行线得到导航线公式，最终控制机体沿导航线行驶。同时通过7个不同ROI中同棵果树的分区冠层有无信息逻辑计算得到上、中、下分区冠层的有无信息，依据冠层有无进行自动对靶喷雾。最后对机器人进行自主导航性能和喷雾性能测试，并进行数据绘制，为果园智能植保机械研究提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 硬件设计

图1为整个机器人系统硬件部分，由传感器模块、控制模块、驱动模块、对靶执行模块及电源模块等组成，图中绿色线表示电源供给，蓝色线表示信息传递。传感器模块主要由编码器、惯性测量单元（Inertial Measurement Unit，IMU）、LiDAR及RTK GNSS等组成。LiDAR不仅用于自主导航作业，同时也用于探测果树冠层特征。所以LiDAR的选择是关键，本研究采用的是16线机械式3D激光雷达（深圳市速腾聚创科技有限公司），探测范围水平方向360°、垂直方向30°，探测距离达150 m，探测精度±2 cm，垂直角分辨率为2°，在10 Hz频率下工作时水平角分辨率为0.18°，供电范围为DC 9～32 V，采用100 M以太网与工控机通信。每秒接受32万个点云数据。

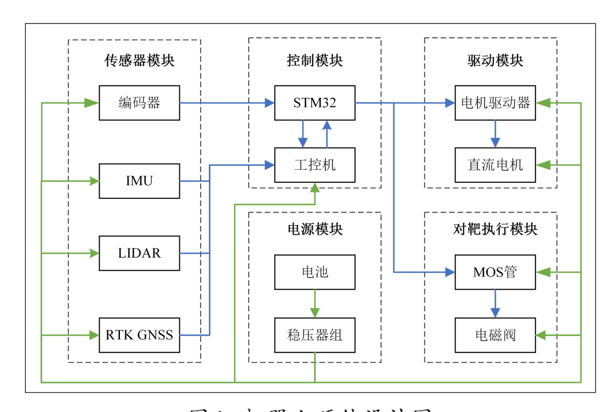



图 1　机器人硬件设计图

Fig. 1  Hardware design of the robot

E6B2-CWZ6C 型编码器（分辨率为 1000 p/r（pulse per ring，脉冲每转））提供速度信息，通过连接轴与机器人主动轮（直径 24 cm）共轴连接。机器人在行驶过程中，会发生偏移、倾斜与车轮打滑等现象，而 ICM-20948 型 IMU 可提供更为准确的速度和机体状态。IMU 自带卡尔曼滤波程序，可提供稳定精确的数据；静态精度 0.05 °/s，X、Y 方向动态精度 0.1 °/s，无磁场干扰时 Z 轴精度 1 °/s，加速度精度 0.02 g，陀螺仪精度为 0.06 °/s，数据最大输出频率为 200 Hz（本研究采用 100 Hz）。为验证机器人导航性能，移动轨迹测量系统需具有足够高的精度，采用兼容了世界主流六大卫星定位系统的“P3-DU” RTK GNSS 定位系统，其水平定位精度为±1 cm，数据输出频率最大为 20 Hz（采用 20 Hz），供电范围为 DC 9～36 V。

面对每秒 32 万个点云，中央处理器（Central Processing Unit，CPU）需具有极强算力，同时考虑恶劣的果园作业环境，处理器应具有足够的防护等级 [13]，选择处理器为 i7 10510U，16 G RAM、1 T 固态硬盘，预装 Ubuntu18.04 Linux 操作系统，拥有 RS232、以太网、USB 及 RS485 等多种通信接口，供电范围为 DC 9～36 V 的国产工控机。微控制器控制机体运动及自动对靶喷雾的执行装置，同时采集编码器信息，采用 M3S 型 STM32 单片机，芯片为 stm32f103zet6，采用 cortex-M3 协议，144 个引脚，flash 内存为 512 k，主频 72 MHz，同时拥有 CAN、USB 及 RS232 等多种通信接口。

本研究选用 2 台 800 W 的直流无刷伺服电机（SDGA08C11AB，48 V 供电）为机器人提供动力，配有 1:30 的变速箱（60TDF-147050-L2H，中国嘉兴），并配有 SDGA-21A 型伺服电机驱动器控制电机转速，驱动器通过 CAN 总线接受来自单片机的角速度控制信号（通信速率为 500k bps，Intel 编码格式）。机器人在空载时最大行驶速度为 1.5 m/s，最大爬坡角度为 30°。可通过左右主动轮不同转速实现差速转向并能 360°原地转向。对靶执行装置安装在轴流风机出风口两侧，根据冠层信息有无控制不同喷头的开闭；安装了可控制管道通断的 2W150-15 型电磁阀（24 V 供电，中国宁波 ADEC 公司），使用 N 沟道场效应 MOS（Metal-Oxide-Semiconductor，场效应管）管控制电磁阀供电通断，进而控制电磁阀开启关闭，MOS 管由单片机 I/O（Input/Output）口输出的高低电平进行控制。

除上述功能模块外，还需电源模块提供电源供给。采用 48 V 的磷酸铁锂电池（SK-48V100 Ah），电池容量为 100 Ah 满电电压约为 55.2 V。同时，安装有可为不同功能模块（5、12、24 及 48 V 供电）提供稳定电压的稳压器组。

喷雾系统由 26 A 型柱塞泵提供液路压力，通过压力阀调节整个喷雾系统压力大小，在喷雾作业过程中保持压力稳定。液泵通过 170 F 汽油机输出轴上三角皮带带动，机体后方的风机通过轴与机体前方的皮带轮连接，该皮带轮同样由汽油机带动。药箱内液体经过泵后进入三路液体分配器，每个分配器分别引出 3、4、3 液路至喷头，喷头与液路间安装有电磁阀。

## 2.2 工作流程

机器人通过图 2 流程实现自主导航及自动对靶喷雾，具体实现过程将在随后章节详细介绍。

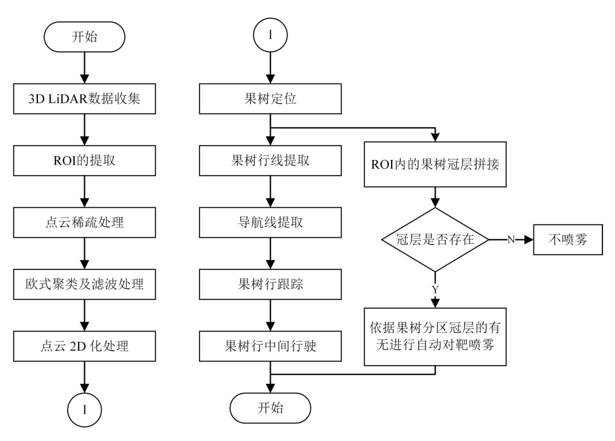


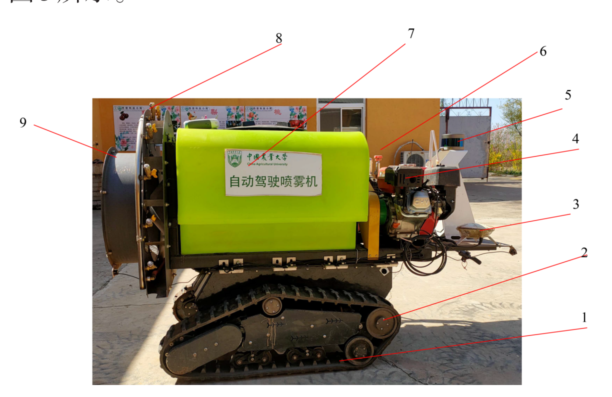

图2　自主导航及自动对靶喷雾实现流程图

Fig. 2 Implementation flow chart of autonomous navigation and automatic target spraying

## 2.3 导航功能的具体实现过程

### 2.3.1 坐标确定

本研究的自主导航兼自动对靶喷雾机器人如图3所示。




注：1. 橡胶履带；2. 主动轮；3. RTK GNSS 移动站；4. 汽油机；5. LiDAR；6. 柱塞泵；7. 药箱；8. 喷头；9. 轴流风机

图3　自主导航兼自动对靶喷雾机器人实物图

Fig. 3 Physical picture of autonomous navigation and autonomic target spraying robot

由机器人基本信息和运动学理论构建机体下一瞬间世界坐标系下的笛卡尔坐标及偏航角（x, y, θ）如公式（1）所示：

$$\begin{bmatrix} x_{w1} \\ y_{w1} \\ \theta_{w1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{w0} & \cos(\theta_{w0}) \times r \\ y_{w0} & \sin(\theta_{w0}) \times r \\ \theta_{w0} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ \omega \times \Delta t \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，$x_{w0}$、$y_{w0}$为当前笛卡尔坐标；$\theta_{w0}$为偏航角，(°)；r为机器人主动轮半径，12 cm；$\omega$为整个机器人运动的角速度，rad/s；Δt为一帧雷达数据的时间，0.1 s。

### 2.3.2 ROI的提取

如图4所示LiDAR水平安装在机器人行驶前方，安装高度1.3 m，最大测距为150 m，理论上可以感知面积约为7 $hm^2$的圆形果园，10 Hz频率下每帧有32,000个点云数据。机器人仅需要机体前后一定范围内的点云信息，过多的信息会造成数据冗余，影响整个系统的实时性，需对冗余信息进行裁剪以提取合适的ROI。

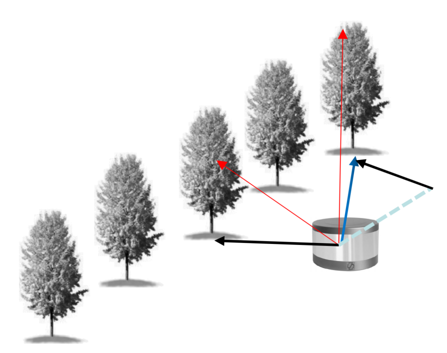


图4　LiDAR 测量范围

Fig. 4 Measurement range of LiDAR

在果园实现机器人定位和自主导航仅需机体两侧果树行前后的数棵果树即可[15]，而本研究的ROI不仅给机器人导航提供定位信息，还需获取果树完整的外貌轮廓特征信息。图4是作业过程中3D LiDAR对一侧果树的探测情况，距LiDAR近的果树仅有局部冠层被探测到，较远的果树能被完全探测到；红线表示激光束，黑线表示LiDAR到树行的垂直距离（果树行距的一半*D*/2，行距4 m），蓝线表示LiDAR到目标果树的线性距离（*d*），蓝线、红线及果树（平均高度为*H*，4.05m）构成直角三角形。该果树是距离LiDAR最近的可探测全部冠层特征信息的果树（机体前方的第*n*棵果树，株距为R，1.5 m）。其中雷达安装高度为*h*，由图4中的几何关系得到公式（2），带入数据知*n*取7。

$$\begin{cases} d = \sqrt{n^2 r^2 + \dfrac{D^2}{4}} \\ \dfrac{H - h}{d} \leqslant \tan 15° \end{cases} \quad (2)$$

由此设ROI的X范围为［−3.0 m，10.5 m］，Y为［−2.5 m，2.5 m］，Z为［−1.9 m，4.8 m］，前进方向为世界坐标X轴正方向。使用点云库（Point Cloud Library，PCL）的直通滤波器对x、y、z三个维度进行裁剪，得到ROI的最终范围。直通滤波器简单高效，可在指定维度下遍历点云中的每个点，并判断该点在指定维度上的取值是否在值域内，删除不在范围内的点。

#### 2.3.3 ROI中的果树定位及导航

使用PCL体素化降采样函数将体素尺寸变为（0.05 m，0.05 m，0.05 m），进一步降低点云数量提高运算速率，并将处理后的点云结果进行存储，将机器人在该ROI区域的世界坐标信息存储到同一内存中方便快速计算。

使用PCL的统计滤波函数将噪声去除，采用PCL的欧式聚类算法对点云进行聚类得到点云数据$P_i$，设最小距离阈值为$h/3$，聚类点的最小和最大数目分别为10和5500个。聚类后将点云投影至$XOY$面，计算投影后点云质心（$X_i$，$Y_i$，0）为果树位置。依据IMU、编码器、LiDAR及果树位置，当机器人行驶到不同行果树中间位置时更新一次ROI。树行拟合采用RANSAC算法，导航线获取及导航跟踪算法与文献［15］相同，最终传递给下位机具体的角速度大小。

### 2.4 软件系统的编写与设计

为提高开发效率，减少重复开发，软件系统主要基于时下流行的机器人操作系统（Robot Operating System，ROS）平台行开发。使用C/C++作为主要开发语言，基于ROS Melodic及Ubuntu18.04进行信息采集处理包、树行识别功能包、导航线提取包、运动控制功能包、分区冠层有无信息逻辑计算包及自动对靶喷雾决策包的开发，如图5所示。整个系统分为应用层、控制层、驱动层及自动对靶喷雾层，其中最重要的是控制层和自动对靶喷雾层。

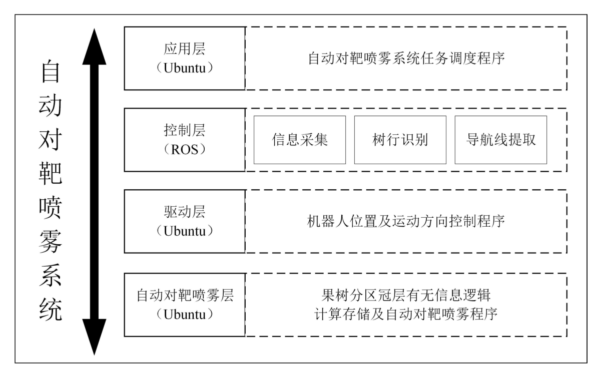



图5 自动对靶喷雾系统软件构成

Fig. 5 Implementation flow chart of automic target spraying system

### 2.5 自动对靶喷雾的实现

#### 2.5.1 果树分区冠层有无信息的确定

确定果树分区冠层的有无是实现自动喷雾的关键。机器人正常作业过程中，ROI内包含9棵果树，LiDAR距喷头1.5 m，LiDAR从收集数据到最后的自动对靶喷雾需一定的反应时间，所以舍弃位于LiDAR后方4棵果树的点云。使用IMU获取的翻滚及偏移角信息矫正ROI内剩余果树冠层点云，重新得到果树中心坐标位置（树干），将果树冠层到雷达距离值$D_s$与树干到雷达距离值$D_g$进行比较，若$D_s$大于$D_g$则该处为空隙（无冠层），反之有冠层。同时将ROI（长10.5 m）两侧果树分为长度为30 cm大小的35个小分区，并根据ROI更新频率将果树冠层上下分为7层，如图6所示。

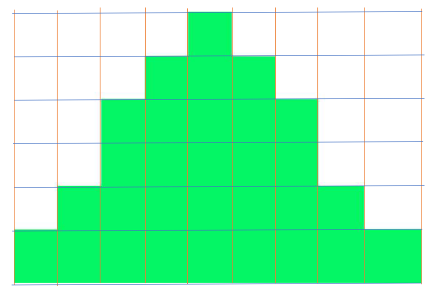
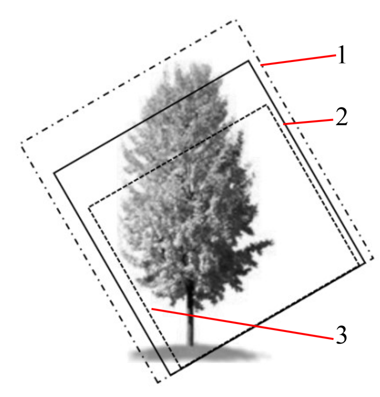


图6 果树冠层分区示意图

Fig. 6 Diagram of fruit tree canopy zoning

LiDAR动态扫描机体两侧果树，将机体在果树间行驶的具体距离融合到LiDAR点云信息中，对ROI进行较为精准的分区。机体行驶到不同行

果树中间位置时更新ROI并矫正机体位置，以消除IMU及编码器轨迹预测的累计误差。




注：1. 未更新ROI时LiDAR可检测到的冠层范围；2. 第一次更新ROI后LiDAR可检测到的冠层范围；3. 第二次更新ROI后LiDAR可检测到的冠层范围

图7　果树分区

Fig. 7 Zoning of fruit tree

由于水平安装的3D LiDAR垂直视场的局限性，整个ROI内仅完整地得到LiDAR前方第7棵果树的点云。图7中的点划线框是第一个ROI内可探测到的果树冠层，第一次更新ROI后可探测到实线框内的果树冠层，第二次更新ROI后为虚线框内的果树冠层，依次类推直至第七次更新ROI机体运动到该果树位置。LiDAR距离果树较远时，所测的果树信息极易受到机体状态（倾斜等）的影响，需使用距LiDAR较近黑色框内冠层有无对点划线框内冠层有无进行矫正，然后使用距LiDAR更近的虚线框内有无信息对黑色框内信息进行矫正。具体使用公式（3）进行逻辑计算实现上述过程。

$$\begin{aligned}&n_1(k)\quad \text{or}\quad n_2(k)\quad \text{or}\quad \cdots\cdots\\&n_{k-1}(k)\quad \text{and}\quad n_k(k)\quad (3\leqslant \mathrm{k}\leqslant 7)\end{aligned}\tag{3}$$

其中，$n_k$为第$k$个ROI区；$k$是冠层从上到下第$k$个分区；or为逻辑“或”运算；and为逻辑“与”运算。当$k$≤2时，取$n_k$（$k$）的值。

可将果树分为7个倾斜的分区，上两个区域为上层，下两个区域为下层，其余为中层。

### 2.5.2　喷头及导流板的调整

如图3所示，共有10个喷嘴，每侧5个，调整喷嘴的位置和方向使其喷向冠层，果树上层对应一个喷嘴，中下层各两个喷嘴。将玻璃绳固定在导流板上，启动风机，观察玻璃绳漂浮方向是否与果树冠层对齐，若不齐，继续调整导流板直至对齐。

### 2.6 数据绘制

采用OriginPro 2020绘制试验结果图。

## 3　试验设计

为验证自主导航性能，于2021年10月11日，在北京市平谷区峪口镇西营村现代化佛见喜梨种植园进行了自主导航及喷雾性能验证试验，试验过程中天气晴，温度为17.2～18.5 ℃，风速为0.8～1.3 m/s。图8是自主导航和喷雾试验示意图，气象站在距基站10 m远的位置用于收集气象条件，RTK GNSS基站在距试验区域15.5 m远的开阔地带。

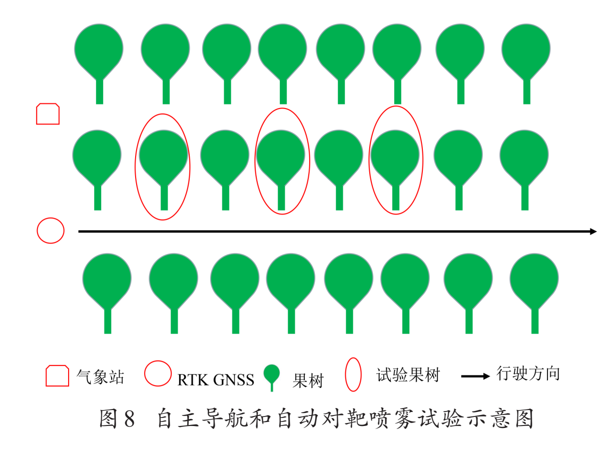



图8　自主导航和自动对靶喷雾试验示意图

Fig. 8 Test schematic of autonomous navigation and antomic target spraying

### 3.1 导航试验

试验前用RTK GNSS移动站探测试验区两侧行首及行末果树坐标，得到果树行公式，进而得到导航线公式。试验时将机器人放置在果园地头果树行中间启动电源和汽油机，随后启动自动对靶喷雾程序，沿着图8中黑色箭头行驶进试验区，试验区距地头10.5 m，长100 m，宽4 m，行驶过试验区2 m后减速至停止，试验重复3次。定义运动轨迹在导航线右侧为横向正偏差，航向

角偏向导航线右侧为正。

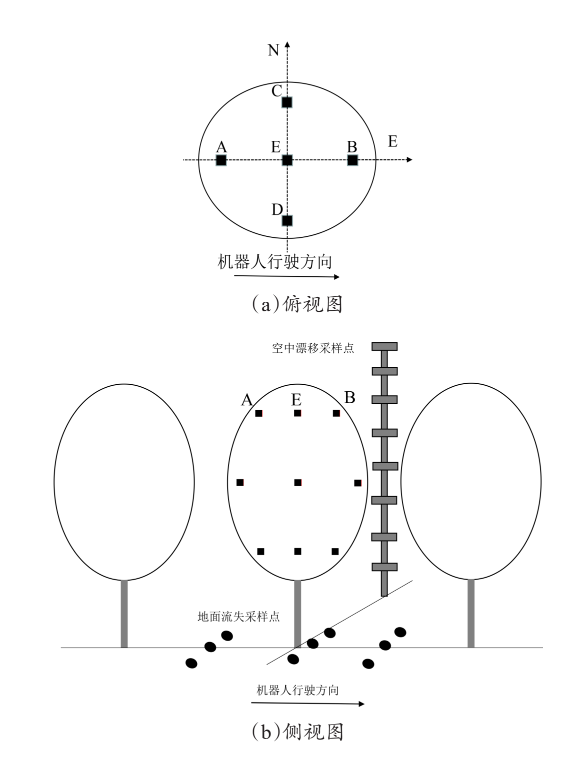
试验时机器人上的RTK GNSS移动站接受机体运动中的位置信号并得到运动轨迹，获取不同时刻下轨迹点到导航线的垂直距离为机器人自主导航时的横向偏差。以导航线为基准线，某个时刻的偏航角可表示为轨迹线与导航线的夹角。

### 3.2 喷雾对比试验

为验证机器人的喷雾性能，如图8所示选择试验区中的3棵果树作为喷雾性能试验植株。试验果树的布样点如图9所示，将试验果树分为上、中、下三层，分别距地面3.2 m、2.4 m及1.6 m高（树干平均高度为1.15 m），每层按照东西南北中布置5片直径为7 cm的滤纸（使用双头夹固定）用于收集雾滴，并在试验果树底部及距离底部0.75 m处的左右两侧各布置3片（每片相距0.5 m）直径为7 cm的滤纸用于收集施药过程中的地面流失。同时在距试验树干1.5 m处布置5 m高的竖直立杆，在距地面高为0.2、0.8、1.4……5.0 m（间隔0.6 m）处用双头夹竖直固定400目的长方形金属网（2.5 cm×7.5 cm）共9个用于收集农药漂移，每三个为一组，将金属网分为上、中、下三层。

使用3.0 g/L的柠檬黄溶液作为试验示踪剂，试验前取药箱内的母液放置暗箱内保存。自动对靶喷雾与传统连续（简称传统）喷雾为同一机器，区别在于自动对靶喷雾启动自动对靶喷雾程序，而传统喷雾不启动。每次喷雾试验机具行进100 m，收集样品到6号自封袋中。

以去离子水为洗脱液，对自封袋样品进行洗脱处理，在自封袋内放置50 mL的去离子水后将其密封，用NMY-100A型水平摇床振荡器对样品进行振荡以充分溶解沉积雾滴，使用100 μL移液枪采集袋内溶液滴入比色皿中，放置到722 s型可见光分光光度计内，在波长426 nm的可见光下测定吸光值，根据文献［25］的方法得到样品的沉积量$V_c$，同时依据滤纸面积得到单位面积雾滴沉积量。两种喷雾模式使用同一药箱内的溶液但喷雾量不同，为对比两种喷雾模式的优劣，使用文献［25，26］的方法对冠层内沉积量进行归一化处理，具体计算方法如公式（4）所示。



(a)俯视图

(b)侧视图

图9 喷雾测试样品布置图

Fig. 9 Spray test sample layout

$$d_g = \frac{V_s \times 10^2}{V_z \times S} \tag{4}$$

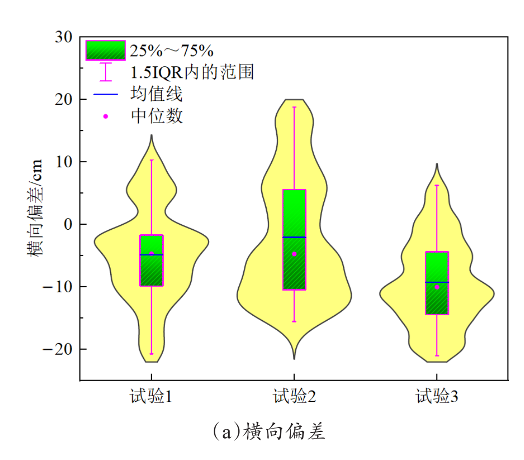
其中，$d_g$为归一化单位面积沉积量，μL/cm²；$V_s$为样品沉积量，μL；$V_z$为施药量，L/h²；$S$为样品面积，cm²。

## 4 试验结果及分析

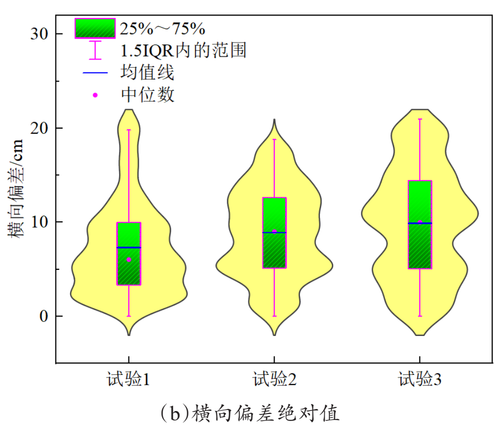
### 4.1 自主导航性能试验结果及分析

图10为自主导航时机器人横向偏差的小提琴箱线图，表示横向偏差的分布状态及概率密度。由图10（a）知3次试验的平均值和中位数皆为负值，说明机体大部分时间行驶在导航线的左侧，且试验2平均值和中位数相差较大而试验1、3无明显差别；由图10（b）知绝对值多小于15 cm，甚至是10 cm，平均数和中位数小于10 cm，说明该具有较高的导航准确性（相比于4 m的行

距），试验2、3平均值及中位数无明显差别，试验1差别明显，说明试验1运动轨迹在导航线左侧时间占比最多，试验3其次，试验2较少。3次试验最大横向偏差绝对值为21.8 cm。




(a)横向偏差




(b)横向偏差绝对值

图10　机器人横向偏差测试结果

Fig. 1　Test results of lateral deviation of the robot

如图11所示，是3次试验的机器人航向偏角绝对值箱线图，最大值为4.02°。随着试验进行，航向偏角的平均值逐渐减小，可能是随着试验进行，试验区内果园道路被机器人压平，使得原本崎岖的果园地面变得较为平整，机体不易发生倾斜，航向偏角也变得更小、更稳定。由以上试验结果可知，自主导航性能满足基本需求。

## 4.2 喷雾对比试验结果及分析

使用两种喷雾模式在试验区进行喷雾作业时测量药液用量，传统喷雾和自动对靶喷雾分别消耗药液量为20.24和16.18 L，换算成每公顷施药

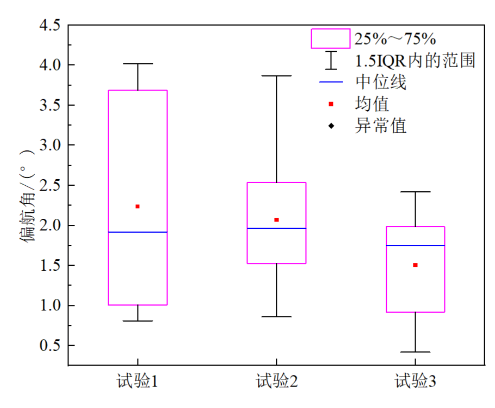



图11　机器人航向偏角测试结果

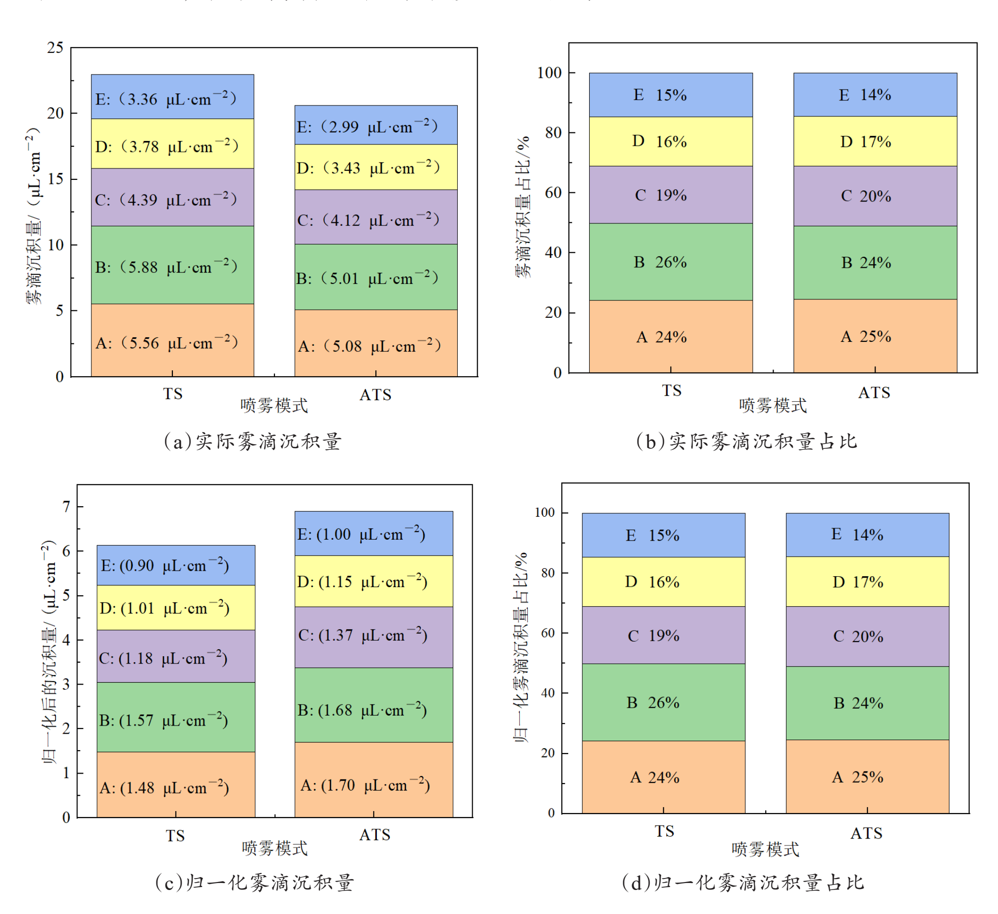
Fig. 11　Steering declination test results of the robot

液量则分别为506和404.5 L/hm²，相比于传统喷雾模式，本研究设计的自动对靶喷雾技术可节省20.06%的农药量。

图12为果树冠层内部实际雾滴沉积量与各点占比及进行归一化处理后数据可视化图。由图12（a）和12（b）可知，传统喷雾与自动对靶喷雾各点沉积量占比相差无几，自动对靶喷雾总沉积量仅比传统喷雾少10.19%，但在归一化沉积后自动对靶喷雾却比传统喷雾增加了12.38%，这说明了自动对靶喷雾节省药液量造成实际沉积量有所减少，但喷雾效果优于传统喷雾，这是因为传统喷雾在空隙处也喷雾，浪费了较多农药。理论上传统喷雾与自动对靶喷雾在冠层内部沉积量相同，而实际喷雾作业中自动对靶喷雾沉积量较少，可能是自动对靶喷雾控制程序延时函数及冠层有无信息存在误判导致。

图13是自动对靶喷雾和传统喷雾在上、中、下层空中实际漂移量及占比情况，两者都是中、下层的漂移量占比最大分别为47%、42%和41%、49%，而上层漂移量仅占比11%和10%，其中传统喷雾漂移量随着收集杆高度的增加而减少，这是因为中上层喷雾距离较远，大雾滴难以达到，而到达的雾滴穿透能力较弱无法穿透冠层漂移到金属筛网上而是沉积到了冠层内部和地面，所以上部漂移量占比最少；自动对靶喷雾中部雾滴占比较多，可能是因为调整了喷头及导流板角度。相比于传统喷雾，自动对靶喷雾的平均

空中漂移可减少38.36%，大大降低了农药漂移的风险。



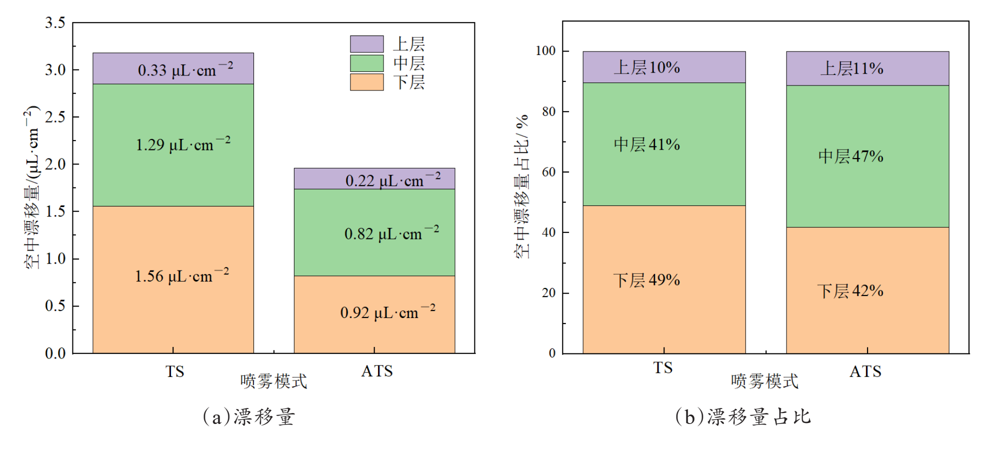
(a)实际雾滴沉积量　　(b)实际雾滴沉积量占比

(c)归一化雾滴沉积量　　(d)归一化雾滴沉积量占比

注：ATS：自动对靶喷雾（Automatic Target Spraying）；TS：传统连续型喷雾（Traditional Spraying）

图12　自动对靶喷雾和传统喷雾的喷雾沉积测试对比结果

Fig. 12  Comparison results of deposition tests between automic target spraying and tranditional spraying



(a)漂移量　　(b)漂移量占比

图13　自动对靶喷雾和传统喷雾的空中漂移量

Fig. 13  Airl drift of automic target spraying and tranditional spraying

图14是自动对靶喷雾和传统喷雾的地面流失量及采集点占比情况，其中采样点B为果树底部，采样点A、C是试验果树左右两侧，可知自动对靶喷雾的地面流失量远小于传统喷雾，且相

比于传统喷雾，自动对靶喷雾地面流失量减少51.36%，可大大降低农药对土壤的污染。相比于两者在漂移量占比方面相似的情况，在地面流失量占比方面完全相反，自动对靶喷雾的采样点B地面流失量占比最大为43%，采样点A、C占比几乎相同；而传统喷雾恰好相反，采样点B占比最小为25%，采样点A、C占比较大且几乎相同。这是因为采样点A、C点是试验果树与临近果树的冠层间空隙，自动对靶喷雾在空隙处不喷雾而传统喷雾无视标靶差异在空隙处喷雾，造成了果树间空隙处无效喷雾进而造成地面流失严重，自动对靶喷雾空隙处不喷雾冠层区域正常喷雾，这可能是自动对靶喷雾果树底部地面流失量占比较大的原因。该机器人相比于传统喷雾机，农药空中漂移量减少了38.68%，地面流失量减少了51.40%，降低了施药过程中对环境的污染。

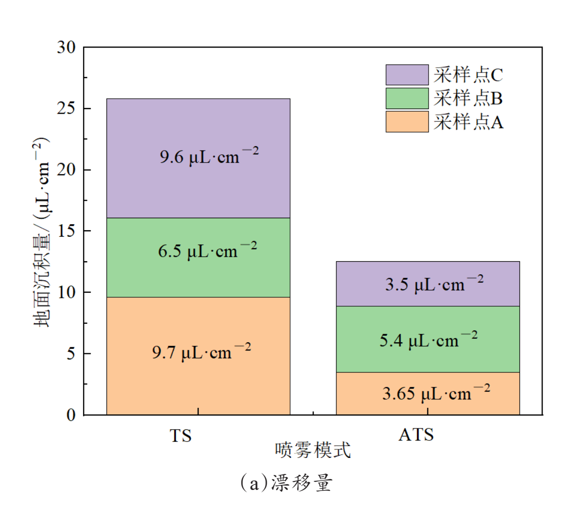
## 5 结 论

本研究采用单个3D LiDAR、编码器及IMU实现了果园机器人的自主导航和自动对靶喷雾作业。同时设计了自主导航性能试验及喷雾性能试验，试验结果表明该机器人完全满足果园自主导航和自动对靶喷雾的要求，主要结论如下。

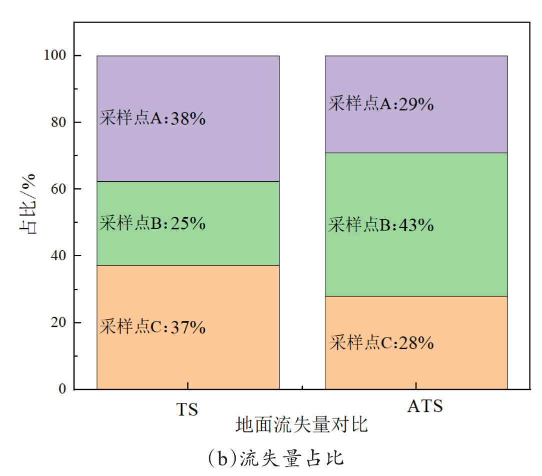
（1）该机器人在自主导航过程中，机器人最大横向偏差为21.8 cm，最大航角为4.02°，完全满足基本的果园自主导航作业需求。

（2）该机器人相比于传统喷雾机，施药液量可减少20.06%，虽然冠层内沉积量减少了12.38%，却提高了喷雾性能且雾滴空中漂移量减少了38.68%，地面流失量减少了51.40%，可降低施药机具对环境的污染。

（3）该机器人与传统喷雾机在农业空中漂移量占比方面无明显差别，而在地面流失占比方面，在试验果树底部地面流失占比最大为43%，试验果树与左右临近果树的中间流失量占比较小分别为29%及28%，而传统喷雾机地面流失量占比情况与之相反。




(a)漂移量




(b)流失量占比

图14 自动对靶喷雾和传统喷雾的地面流失量

Fig. 14 Ground loss of automic target spraying and trandi-tional spraying

## 参考文献：


[1] 刘理民, 何雄奎, 刘亚佳. 多功能果园作业平台安全性研究进展[J]. 农业工程, 2020, 10(12): 7-13.
LIU L, HE X, LIU Y. Research progress on safety of multifunctional orchard operating platform[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(12): 7-13.

[2] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80-92.
ZHOU L, XUE X, ZHOU L, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 80-92.

[3] MAO W, LIU H, HAO W, et al. Development of a combined orchard harvesting robot navigation sys-

tem[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): ID 675.
[4] PEREZ-RUIZ M, UPADHYAYA K S. GNSS in precision agricultural operations[M]. London: IntechOpen, 2012.
[5] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 389-397.
HE X. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: A review[J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 389-397.
[6] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1):133-146.
HE X. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133-146.
[7] 郭成洋. 果园智能车辆自动导航系统关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
GUO C. Key technologies of automatic vehicles navigation system in orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
[8] LI M, IMOU K, WAKABAYASHI K, et al. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2(3): 1-16.
[9] VROCHIDOU E, OUSTADAKIS D, KEFALAS A, et al. Computer vision in self-steering tractors[J]. Machines, 2022, 10(2): ID 129.
[10] RADCLIFFE J, COX J, BULANON D M, et al. Machine vision for orchard navigation[J]. Computers in Industry, 2018, 98: 165-171.
[11] 闫成功, 徐丽明, 袁全春, 等. 基于双目视觉的葡萄园变量喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 13-22.
YAN C, XU L, YUAN Q, et al. Design and experiments of vineyard variable spraying control system based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(11): 13-22.
[12] HESS W, KOHLER D, RAPP H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. Proceedings[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, New York, USA: IEEE, 2016.
[13] SANTOS L C, AGUIAR A S, SANTOS F N, et al. Navigation stack for robots working in steep slope vineyard[M]. Berlin, Germany: Springer Publisher, 2021.
[14] JIANG S, WANG S, YI Z, et al. Autonomous navigation system of greenhouse mobile robot based on 3D LiDAR and 2D LiDAR SLAM[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: ID 815218.
[15] 刘伟洪, 何雄奎, 刘亚佳, 等. 果园行间3D LiDAR导航方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 165-174.
LIU W, HE X, LIU Y, et al. Navigation method between rows for orchard based on 3D LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 165-174.
[16] FRANK D L, STARCHER S, CHANDRAN R S. Comparison of mating disruption and insecticide application for control of peach tree borer and lesser peachtree borer (*Lepidoptera: Sesiidae*) in Peach[J]. Insects, 2020, 11(10): ID 658.
[17] 姜红花, 白鹏, 刘理民, 等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 189-195.
JIANG H, BAI P, LIU L, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(S1): 189-195.
[18] 姜红花, 刘理民, 柳平增, 等. 面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 120-129.
JIANG H, LIU L, LIU P, et al. Online calculation method of fruit trees canopy volume for precision spray[J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(7): 120-129.
[19] 刘理民. 基于果树冠层探测的变量喷雾技术研究与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
LIU L. Research and experiment of variable spray technology based on fruit trees canopy detecting[D]. Taian: Shanong Agricultural University, 2019.
[20] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70-76.
LI L, HE X, SONG J, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70-76.
[21] ZHANG S, GUO C, GAO Z, et al. Research on 2D laser automatic navigation control for standardized orchard[J]. Applied Sciences (Switzerland), 2020, 10(8): ID 2763.
[22] 窦汉杰, 翟长远, 王秀, 等. 基于LiDAR的果园对靶变量喷药控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 11-21.
DOU H, ZHAI C, WANG X, et al. Design and experiment of the orchard target variable spraying control system based on LiDAR[J]. Transactions of the CASE, 2022, 38(3): 11-21.
[23] 刘理民, 张晓辉, 石光智, 等. 多态自动对靶风送式喷雾试验台的设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 260-263.
[24] 刘理民, 王金宇, 毛文华, 等. 基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 347-353, 359.
LIU L, WANG J, MAO W, et al. Canopy information acquisition method of fruit trees based on fused sensor array[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(S1): 347-353, 359.

[25] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 56-63.
LI L, HE X, SONG J, et al. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 56-63.
[26] GIL E, ESCOLÀ A, ROSELL J R, et al. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors[J]. Crop Protection, 2007, 26(8): 1287-1297.

# Autonomous Navigation and Automatic Target Spraying Robot for Orchards

LIU Limin[1,2], HE Xiongkui[1,2*], LIU Weihong[3], LIU Ziyan[1,2], HAN Hu[1,2], LI Yangfan[1,2]

(1. *College of Science*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*;
2. *College of Agricultural Unmanned System*, *China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*;
3. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

**Abstract:** To realize the autonomous navigation and automatic target spraying of intelligent plant protect machinery in orchard, in this study, an autonomous navigation and automatic target spraying robot for orchards was developed. Firstly, a single 3D light detection and ranging (LiDAR) was used to collect fruit trees and other information around the robot. The region of interest (ROI) was determined using information on the fruit trees in the orchard (plant spacing, plant height, and row spacing), as well as the fundamental LiDAR parameters. Additionally, it must be ensured that LiDAR was used to detect the canopy information of a whole fruit tree in the ROI. Secondly, the point clouds within the ROI was two-dimension processing to obtain the fruit tree center of mass coordinates. The coordinate was the location of the fruit trees. Based on the location of the fruit trees, the row lines of fruit tree were obtained by random sample consensus (RANSAC) algorithm. The center line (navigation line) of the fruit tree row within ROI was obtained through the fruit tree row lines. The robot was controlled to drive along the center line by the angular velocity signal transmitted from the computer. Next, the ATRS's body speed and position were determined by encoders and the inertial measurement unit (IMU). And the collected fruit tree zoned canopy information was corrected by IMU. The presence or absence of fruit tree zoned canopy was judged by the logical algorithm designed. Finally, the nozzles were controlled to spray or not according to the presence or absence of corresponding zoned canopy. The conclusions were obtained. The maximum lateral deviation of the robot during autonomous navigation was 21.8 cm, and the maximum course deviation angle was 4.02°. Compared with traditional spraying, the automatic target spraying designed in this study reduced pesticide volume, air drift and ground loss by 20.06%, 38.68% and 51.40%, respectively. There was no significant difference between the automatic target spraying and the traditional spraying in terms of the percentage of air drift. In terms of the percentage of ground loss, automatic target spraying had 43% at the bottom of the test fruit trees and 29% and 28% at the middle of the test fruit trees and the left and right neighboring fruit trees. But in traditional spraying, the percentage of ground loss was, in that sequence, 25%, 38%, and 37%. The robot developted can realize autonomous navigation while ensuring the spraying effect, reducing the pesticides volume and loss.

**Key words:** automatic navigation; automatic target spraying; LiDAR; random sample consensus algorithm; robot; IMU